

半导体光放大器的色散特性

林青 简阳天 王苒 王智 吴重庆

北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室,北京 100044

摘要 半导体光放大器(SOA)是光信号处理的关键器件,其非线性过程是实现全光信号处理的基础,群速度色散(GVD)直接影响非线性效应的强弱。基于Kramers-Kronig关系,得到了SOA群速度色散与增益之间的关系,提出一种通过测量SOA的增益谱,得到群速度色散的简单易行的实验方法,在小信号输入条件下验证了该方法的可靠性。利用该方法,在1530~1610 nm波长范围内,测量得到SOA群速度色散比较平坦,而且随输入光功率和注入电流变化不大,增益峰值波长与零色散波长随注入电流增大而蓝移,随输入光功率增大而红移,且零色散波长大于增益峰值波长。

关键词 非线性光学;全光信号处理;半导体光放大器;增益;群速度色散

中图分类号 TN929 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.070602

Dispersion Properties of the Semiconductor Optical Amplifiers

Lin Qing Jian Yangtian Wang Ran Wang Zhi Wu Chongqing

Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The semiconductor optical amplifier (SOA) is the key device for all optical signal processing, and the principle mechanism is its nonlinearity, which heavily depends on its group velocity dispersion (GVD). Based on the Kramers-Kronig relation, the relationship between GVD and the optical gain is obtained. A simple scheme to measure the GVD of the SOA is proposed with some computations from the measured gain spectra, and it is verified with the comparison between the analytical simulations and the measurements under the condition of small signal input. The dispersion is relatively flat in the range of 1530~1610 nm, and lightly depends on the input power and the injection current. The peak-gain wavelength and zero-dispersion wavelength red-shift with the input power increasing and blue-shift with the injection current increasing, and the zero-dispersion wavelength is greater than the peak-gain wavelength.

Key words nonlinear optics; all optical signal processing; semiconductor optical amplifier; gain; group velocity dispersion

OCIS codes 060.4510; 190.4360; 260.2030

1 引言

半导体光放大器(SOA)广泛应用于光纤通信网络^[1-2]、光纤传感系统^[3]和高速光信号处理技术^[2]中。线性功率放大型SOA可以作为光发送机的功率放大器、光纤系统的在线中继放大器、光接收机的前置放大器和光分路补偿功率放大器,也可以与其他光器件构成环形腔激光器,用于光纤通信系统的测量^[4]和光学相干断层扫描(OCT)^[5]等光纤传感。高非线性SOA和低载流子寿命SOA在高速全光信号处理方面已经实现了高速光开关、波长变换、多种全光逻辑、偏振控制器等。

收稿日期: 2014-02-17;收到修改稿日期: 2014-02-26;网络出版日期: 2014-06-06

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20120009110032)、北京市自然科学基金(4132035)、中央高校基本科研业务费(2012JBM103)

作者简介: 林青(1990—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信和全光信号处理方面的研究。

E-mail: 12121704@bjtu.edu.cn

导师简介: 王智(1971—),男,博士,教授,主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn

SOA 由于其高非线性和高集成度等特点,已经成为全光信号处理的关键器件,但是,非线性效应不仅与 SOA 的结构、工作电流、外部注入光功率等有关,而且非线性效率以及基于非线性完成的各种功能器件性能与群速度色散[常简称色散(GVD)]有关,由于信号光的走离现象,SOA 在色散较小时能表现出更好的非线性效应。因此,研究 SOA 的色散特性,不仅是研究 SOA 的自身传输特性,更是优化其非线性效应、提高光信号处理器件性能的关键之处。

目前,对 SOA 的色散研究报道并不多见。为了研究方便,最早 Agrawal^[6]曾假设 SOA 的色散值,但是后来被验证该假设值不正确^[7]。Runge 等^[7]计算出了 1300~1800 nm 范围内 SOA 的色散,并分析了载流子浓度和温度对色散的影响,但是仅报道了数值计算结果,没有相关的实验研究结果。Hall 等^[8]曾测量波长在 1550 nm 附近 V 型槽半导体激光器的色散,但其测量的波导色散并不适合现在 SOA 的非谐振结构。

本文基于 Kramers-Kronig 关系,得到 SOA 色散与增益的关系,提出一种测量 SOA 群速度色散的简单易行的方法,实验测量结果与理论仿真结果一致性很高。

2 SOA 群速度色散与增益的关系

SOA 内部载流子密度与注入电流密度、注入光子数密度等有关,当载流子密度变化时,引起复折射率 $n=n_r+jn_i$ 和传输常数 $\beta=\beta_r+j\beta_i$ 的变化,实部和虚部分别对应相移 $\varphi=\beta_r z$ 和 SOA 的增益 $G=\exp(-2\beta_i z)$,这里 z 表示 SOA 有源区的长度。由描述复折射率实部虚部关系的 Kramers-Kronig 关系,可得半导体光放大器中信号相移与增益有以下关系^[9]:

$$\varphi = -\frac{\alpha}{2} \ln G, \quad (1)$$

式中 α 为线宽增强因子。参考普通光纤的群速度色散定义,定义 SOA 的群速度色散系数为单位长度单位波长间隔的时延差,经简单数学计算,可得到单位长度 SOA 的群速度色散系数 D 为

$$D = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \beta_r''(\lambda) - \frac{\lambda}{\pi c} \beta_r'(\lambda), \quad \left(\beta_r' = \frac{d\beta_r}{d\lambda}, \beta_r'' = \frac{d^2\beta_r}{d\lambda^2} \right), \quad (2)$$

式中 β_r 为相移常数。那么 SOA 的总色散 $D_{\text{GVD}}(\equiv D \cdot z)$ 可以表示为

$$D_{\text{GVD}} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \varphi''(\lambda) - \frac{\lambda}{\pi c} \varphi'(\lambda), \quad \left(\varphi' = \frac{d\varphi}{d\lambda}, \varphi'' = \frac{d^2\varphi}{d\lambda^2} \right). \quad (3)$$

由(1)式,将(3)式中相位对波长的微分替换为增益 G 对波长的微分,得到:

$$D_{\text{GVD}} = -\frac{\lambda^2}{4\pi c} \alpha \frac{1}{G^2} (G')^2 + \frac{\lambda^2}{4\pi c} \alpha \frac{1}{G} G'' + \frac{\lambda}{2\pi c} \alpha \frac{1}{G} G'. \quad (4)$$

(4)式表明 SOA 的总色散与增益的关系,因此,通过理论或实验得到 SOA 的增益特性后,即可由此式得到其色散特性。

在增益峰值波长处(λ_{gp}), $G'=0$, 此处色散 $D_{\text{GVD}} = \frac{\lambda^2}{4\pi c} \alpha \frac{1}{G} G'' < 0$ 。在零色散波长处(λ_{d0}), 即 $D_{\text{GVD}}=0$, 由(4)式可得:

$$G'' = \frac{(G')^2}{G} - \frac{2G'}{\lambda}. \quad (5)$$

对于 $\lambda < \lambda_{\text{gp}}$, 即在增益峰值左侧短波长处,有 $G' > 0$, G'' 的符号与增益大小和波长位置有关,不易确定在短波长侧是否存在零色散点,如果存在零色散点,那么当然有 $\lambda_{\text{d0}} < \lambda_{\text{gp}}$ 。

对于 $\lambda > \lambda_{\text{gp}}$, 即在增益峰值右侧长波长处,有 $G' < 0$, 因此 $G'' > 0$, 即零色散波长 λ_{d0} 应在增益谱曲线向上开口范围内,显然 $\lambda_{\text{d0}} > \lambda_{\text{gp}}$, 即零色散波长大于增益峰值波长。

为了便于讨论,选用以下简洁的增益模型讨论 SOA 特性。光信号经 SOA 传输后的小信号增益可描述为^[10]

$$G_i = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_s}{(1-\sqrt{R_1 R_2} G_s)^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} G_s \sin^2[\pi(v_i - v_0)/\Delta v]}, \quad (6)$$

式中 R_1 和 R_2 分别为端面反射率, v_0 为增益介质增益谱的中心频率, v_i 为输入光频率, Δv 为自由光谱区范围(FSR), G_s 为信号光在芯片内所获得的单程增益,即

$$G_s = \exp[\Gamma(g_i - \alpha_0)L], \quad (7)$$

式中 Γ 为有源层内光功率限制因子, α_0 为有源材料的吸收损耗系数, L 为有源区长度, g_i 为增益介质的增益系数, 这里 α_0 表示为^[11]

$$\alpha_0 = K_0 + \Gamma K_1 N, \quad (8)$$

式中 K_0 和 K_1 分别为独立吸收损耗系数和非独立吸收损耗系数, N 为注入载流子浓度。在考虑增益谱的色散和非对称性情况下, 增益系数可表示为^[12]

$$g_i = g_N(N - N_0) - a_1(\lambda_i - \lambda_p)^2 + a_2(\lambda_i - \lambda_p)^3, \quad (9)$$

式中 g_N 为微分增益系数, N_0 为透明载流子浓度, a_1 和 a_2 分别是与增益色散和增益谱不对称性相关的常数, λ_p 为增益系数所对应的峰值波长, 表示为

$$\lambda_p = \lambda_0 - a_3(N - N_0), \quad (10)$$

式中 λ_0 是对应透明载流子浓度的增益峰值波长, a_3 为波长漂移系数。

3 测量方法的可靠性

因前文所述增益模型为小信号增益, 所以, 首先对小信号的情况进行理论与实验研究。实验中, 使用可调谐激光器 (SANTEC 公司 ts1-210) 在 1530~1610 nm 范围内调谐 (实验中调谐波长间隔均为 0.5 nm), 测量入射光功率 40 μ W 时的 SOA (Inphenix, 注入电流 130mA) 输出光功率, 从而得到增益。对 SOA 的增益谱进行数值模拟时, 采用如表 1 所示的参数。

表 1 SOA 仿真参数

Table 1 Simulation parameters of SOA

Parameter	Value	Parameter	Value
Active region length L /m	5.0×10^{-4}	Differential gain coefficient g_N / m^2	2.73×10^{-20}
Facet reflectivity R_1, R_2	5.0×10^{-5}	Gain constant a_1 / m^{-3}	0.8×10^{18}
Linewidth enhancement factor α	5	Gain constant a_2 / m^{-4}	0.9×10^{25}
Optical mode confinement factor Γ	0.4	Wavelength drift factor a_3 / m^4	3.5×10^{-32}
Carrier independent absorption loss coefficient K_0 / m^{-1}	6200	Transparency carrier density N_0 / m^{-3}	2.0×10^{24}
Carrier dependent absorption loss coefficient K_1 / m^2	7.5×10^{-21}	Transparency wavelength λ_0 /m	1.584×10^{-6}

图 1(a) 是数值模拟与实验测量的 SOA 增益谱, 图中实线是由实验测量的散点经高阶多项式拟合得到的, 如果忽略由于 SOA 的双折射效应引起的实测增益谱近似周期性波动 (图中的散点), 图中显示增益谱的理论计算 (图中点划线) 和实验测量结果一致性非常好。

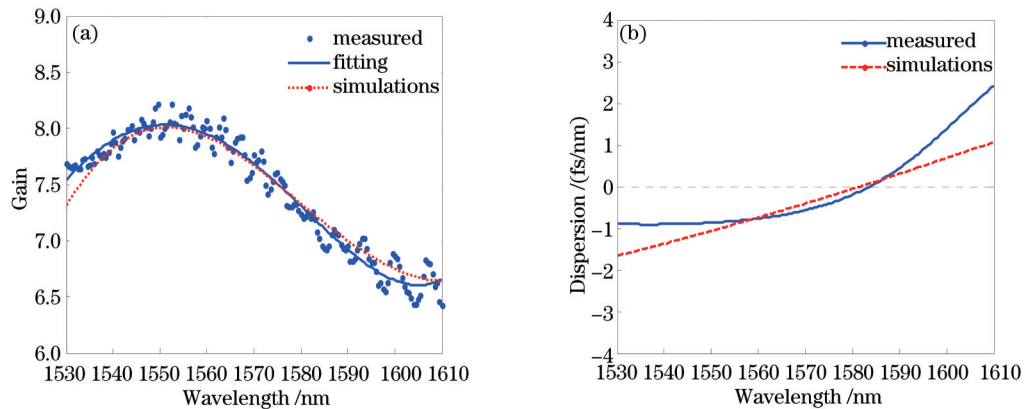


图 1 小信号时实验测量与理论计算结果。(a) 增益谱; (b) 群速度色散

Fig.1 Theoretical calculations and experiments with small signal input. (a) Gain spectra; (b) GVD.

由 (4) 式得到理论计算和实验测量的色散如图 1(b) 所示, 二者一致性较好, 零色散点位置基本重合, 色散变化趋势基本相同。在电流为 130 mA, 输入光功率为 40 μ W 时, SOA 的零色散波长约为 1584 nm, 在 1550 nm 处的色散值约 -0.87 fs/nm, 整个测量范围内, 色散变化仅约 3.32 fs/nm。由于实际使用的 SOA 的结

构参数很难准确确定,如果考虑实验中各种误差因素,如光源不稳定(波长与光功率波动)、SOA增益波动、双折射等,由图1的结果比较,所提出的测量增益谱得到群速度色散的实验方法,具有可靠的理论基础和切实可行的实验方案。将采用这一方法对SOA的色散特性进行深入的实验研究。

4 SOA的色散特性

分别改变SOA的注入电流和输入光功率,实验测量波长调谐时光信号的增益,利用(4)式计算得到其色散,进一步讨论零色散波长与工作条件的关系。

4.1 色散与注入电流的关系

输入光功率为 $100\ \mu\text{W}$,注入电流分别为130、120、110、100、90 mA时,实验测量的SOA增益及色散特性如图2所示。由图2(a)可知随着SOA注入电流的增大,输入光所获得的增益逐渐增大,且增益峰值波长向短波长方向移动。图2(b)是由增益计算得到的色散曲线图,可以看出,在测量波长范围内,SOA色散值变化较小,色散曲线较平坦,由于实验测量时存在误差,120 mA处零色散波长略小于130 mA处,但零色散点整体变化趋势不受影响,随着注入电流增大,长波长侧的零色散点略有蓝移,但总体色散特性没有明显变化。图2(c)是增益峰值波长 λ_{Gp} 和长波长侧零色散波长 λ_{D0} 与注入电流的关系图,随着注入电流增大,不考虑120 mA处的实验误差, λ_{Gp} 和 λ_{D0} 均向短波长方向偏移,二者的变化趋势几乎相同,但在数值上存在一定差距,零色散波长大于峰值波长,与(5)式关于 $\lambda_{\text{D0}} > \lambda_{\text{Gp}}$ 的理论结果一致。理论上,注入电流增大必将导致载流子浓度增大,由(10)式可知,峰值波长应该往短波长方向偏移[图2(c)的虚线],这一结论与实验测量的增益峰值波长变化一致。

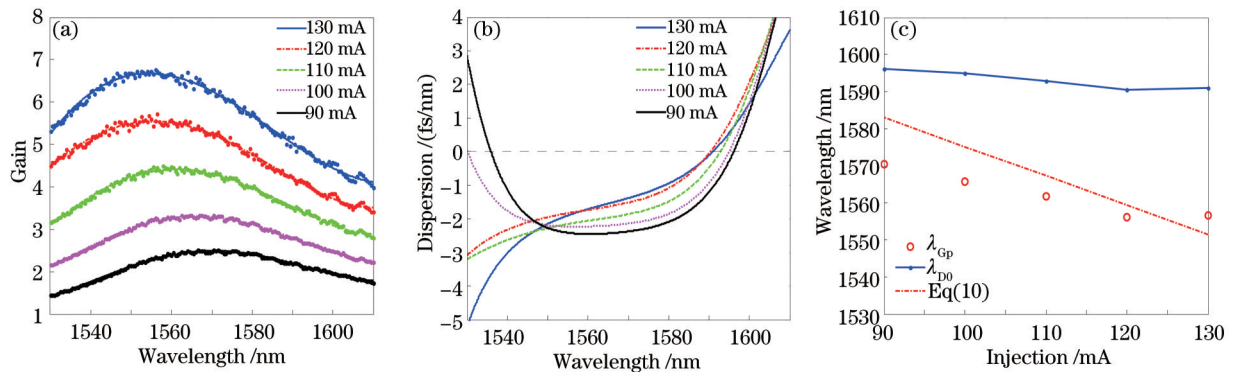


图2 不同注入电流时SOA的增益与色散特性。(a)增益谱;(b)群速度色散;(c) λ_{Gp} 和 λ_{D0}

Fig.2 Gain and dispersion with different injection currents. (a) Gain spectra; (b) GVD; (c) λ_{Gp} and λ_{D0}

4.2 色散与输入光功率的关系

注入电流为130 mA,输入光功率分别为40、60、80、100、200、500 μW 时,实验测量的SOA增益谱如图3(a)所示,图中实线是各组测量数据的多项式拟合结果。显然,随着输入光功率的增大,输入光所获得的增益逐渐减小,而且增益谱有一峰值,对应的峰值波长 λ_{Gp} 随输入光功率增大向长波长方向缓慢漂移。利用(4)式对测量的增益进行计算,得到如图3(b)所示的对应不同输入光功率的色散曲线。在1530~1610 nm范围内,SOA色散

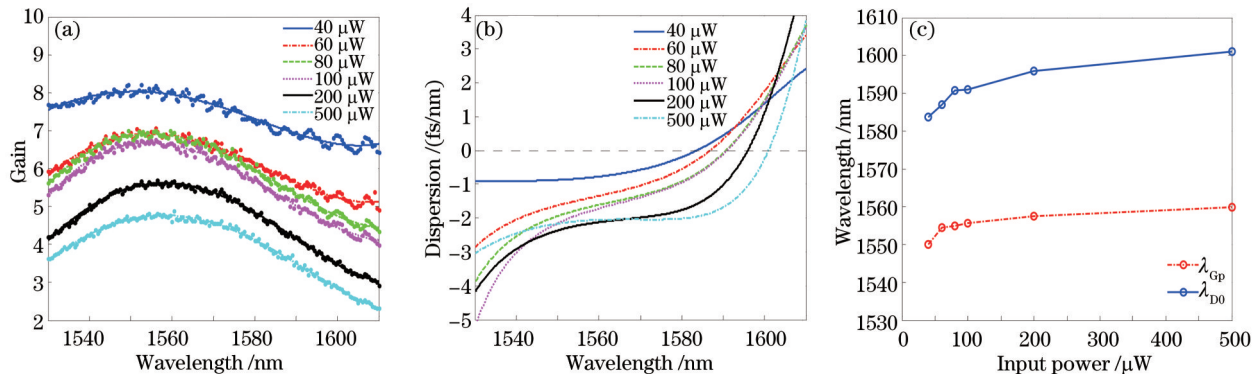


图3 不同输入光功率时SOA的增益与色散特性。(a)增益谱;(b)群速度色散;(c) λ_{Gp} 和 λ_{D0}

Fig.3 SOA gain and dispersion with different input powers. (a) Gain spectra; (b) GVD; (c) λ_{Gp} and λ_{D0}

既可表现为正常色散,也可表现为反常色散,色散值在 $-5\sim-4$ fs/nm,而且色散平坦。由图3(b)可知,随着输入光功率的增大,零色散波长略向长波长偏移,但输入功率对色散的整体影响不大,每条曲线的趋势基本相同,在较宽波长范围内色散平坦。图3(c)给出了增益峰值波长 λ_{Gp} 和零色散波长 λ_{D0} 与输入光功率之间的关系。二者均随输入功率的增大向长波长方向移动,且变化趋势几乎相同,数值关系与(5)式关于 $\lambda_{D0} > \lambda_{Gp}$ 的理论结果一致。理论上,固定SOA注入电流,增大输入光功率时,消耗更多载流子,SOA内部载流子密度 N 将减小,因此,由(10)式可知,增益峰值波长将增大,该结论与实验测量结果一致。

5 结 论

基于K-K关系,得到了半导体光放大器群速度色散与增益之间的关系,并以此为理论基础,提出了一种测量SOA群速度色散的实验方法,通过测量SOA的增益谱,得到色散特性,并在小信号输入条件下验证该方法的可靠性。利用该方法,深入研究了SOA不同注入电流和输入光功率时的增益与色散特性,结果表明在1530~1610 nm范围内,色散比较平坦,而且随注入电流和输入光功率变化不大,非常适于非线性效应的应用。增益峰值波长与零色散波长随注入电流增大而蓝移,随输入光功率增大而红移,且零色散波长大于增益峰值波长。

参 考 文 献

- 1 Yan Yumei, Yin Lina, Zhou Yunfeng, *et al.*. 10 Gbit/s all-optical non-return-to-zero to return-to-zero conversion based on terahertz optical asymmetric demultiplexer [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(11): 1510-1514.
闫玉梅, 尹丽娜, 周云峰, 等. 利用TOAD实现10 Gbit/s全光非归零码到归零码的转换[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1510-1514.
- 2 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Ding Yuan, *et al.*. High speed wavelength conversion and format conversion based on semiconductor optical amplifier and optical filter [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(7): 940-944.
董建绩, 张新亮, 丁园, 等. 利用半导体光放大器和滤波器组合实现高速波长转换和码型转换[J]. *中国激光*, 2007, 34(7): 940-944.
- 3 Wang Hua, Yao Minyu, Zhang Hongming, *et al.*. Multi-wavelength fiber ring laser with semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(11): 1502-1506.
王华, 姚敏玉, 张洪明, 等. 采用半导体光放大器的多波长光纤环形激光器[J]. *中国激光*, 2007, 34(11): 1502-1506.
- 4 Chen Daru. *Advanced Optical Fiber Laser Technology and Its Use in the Application of Optical Sensor and Optical Microwave* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
陈达如. 先进光纤激光器技术及其在光传感、光学微波产生的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- 5 Huang S W, Aguirre A D, Huber R A, *et al.*. Swept source optical coherence microscopy using a Fourier domain mode-locked laser [J]. *Opt Express*, 2007, 15(10): 6210-6217.
- 6 Agrawal G P. Effect of gain dispersion on ultrashort pulse amplification in semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27(6): 1843-1849.
- 7 Runge P, Elschner R, Petermann K. Chromatic dispersion in InGaAsP semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(5): 644-649.
- 8 Hall K L, Lenz G, Ippen E P. Femtosecond time domain measurements of group velocity dispersion in diode lasers at 1.5 μm [J]. *J Lightwave Technol*, 1992, 10(5): 616-619.
- 9 Agrawal G P, Olsson N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1989, 25(11): 2297-2306.
- 10 Huang Dexiu, Zhang Xinliang, Huang Lirong. *Semiconductor Optical Amplifier and its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2012.
黄德修, 张新亮, 黄黎蓉. 半导体光放大器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- 11 Connelly M J. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2001, 37(3): 439-447.
- 12 Zhang Xinliang, Dong Jianji, Wang Ying, *et al.*. Experimental and theoretical investigation on novel all-optical logical and gates [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(5): 2066-2071.
张新亮, 董建绩, 王颖, 等. 新型全光逻辑与门的理论和实验研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(5): 2066-2071.